

# ベクトル・スカラーポテンシャルを用いた差分法による人工信号源電磁誘導の3次元モデリング

## Finite difference 3-D modeling of controlled- source electromagnetic induction using vector and scalar potentials

光畑 裕司 ((独)産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門)

Yuji Mitsuata (National Institute Advanced Industrial Science and Technology)

### Abstract

A 3D staggered-grid finite difference modeling code for the analysis of controlled-source electromagnetic data has been developed by using vector and scalar potential formulas. The presented modeling results show the effect Dirichlet boundary condition is significant near the computation area boundaries. Developing a more sophisticated boundary condition is necessary to improve the accuracy of modeling results in a further study.

人工信号源を用いた電磁探査法データの解析法を構築するため、スタガード差分法による3次元モデル手法を開発した。準定常状態のマックスウェル方程式における磁束密度  $B$  と電場  $E$  を、磁気ベクトルポテンシャル  $A$  と電気スカラーポテンシャル  $\phi$  を用いて以下の様に記述し、

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \quad \mathbf{E} = -i\omega\mathbf{A} - \nabla\phi, \quad (1)$$

そして、 $A$  についてのゲージ不定性を取り除くために、クーロン条件:  $\nabla \cdot \mathbf{A} = 0$  を採用した。スタガード格子における  $A$  と  $\phi$  の配置を第1図に示す。最終的な構成方程式は、大気と大地のそれぞれの領域で、次式ようになる。

$$\text{大気中: } \nabla^2 \mathbf{A} = 0,$$

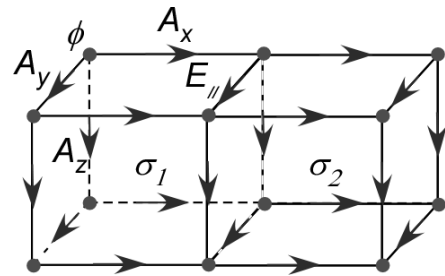
$$\text{大地中: } \nabla^2 \mathbf{A} - \mu\sigma(i\omega\mathbf{A} + \nabla\phi) = -\mu\mathbf{J}_s, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \sigma(i\omega\mathbf{A} + \nabla\phi) = \nabla \cdot \mathbf{J}_s$$

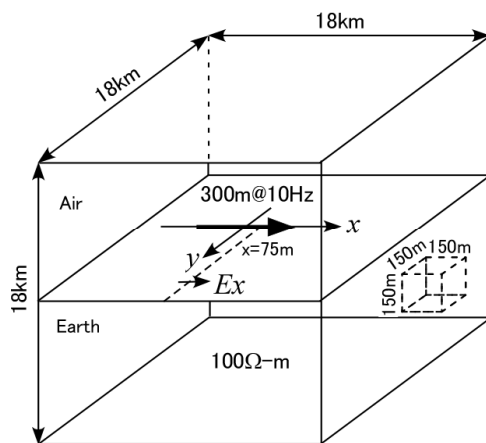
ここで、 $J_s$  は電流源の電流密度を示す。

計算領域の境界条件としては、領域端面において各ポテンシャル成分がゼロとなるようにディリクレ条件を課した。

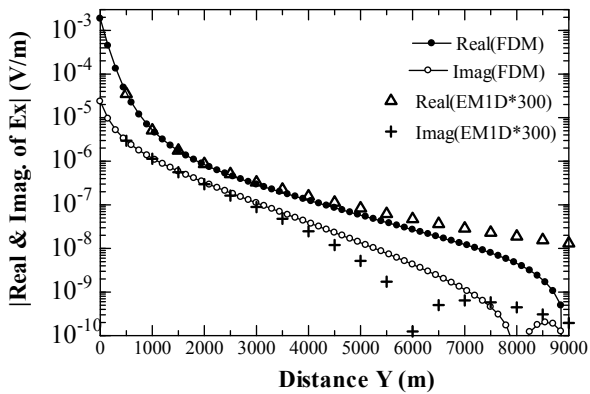
数値計算例として、均質大地(第2図)および埋没角柱導体(第4図)モデルについての計算結果を、第3図および第5図に、測線に沿ったプロファイルとして示す。どちらの場合も、格子間隔は 150m の一定で、格子点数は  $121 \times 121 \times 121$  とした。想定した送信源は、x 方向に向けた長さ 300m の接地電流源で、送信周波数は 10Hz である。100Ω-m 均質大地における表皮深度は 1.6km で、計算領域端面は送信源から表皮深度の約 5 倍の距離に離している。



第1図 スタガード格子における  $A$  と  $\phi$  の配置図。  
Fig . 1. Arrangement of each component of  $A$  and  $\phi$  in a staggered grid.



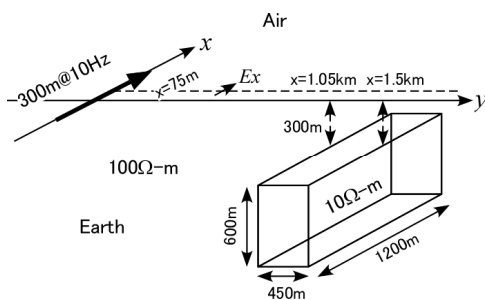
第2図 均質大地モデル. 計算領域は  $18\text{km} \times 18\text{km} \times 18\text{km}$  で、格子間隔は一定で 150m とした。  
Fig . 2. Homogeneous half-space model. The computation area is  $18\text{km} \times 18\text{km} \times 18\text{km}$ , and the node spacing is a 150m constant value.



第3図 均質大地モデルに対する電場  $E_y$  の計算結果(FDM)プロファイル. EM1D による計算値と比較して示す.

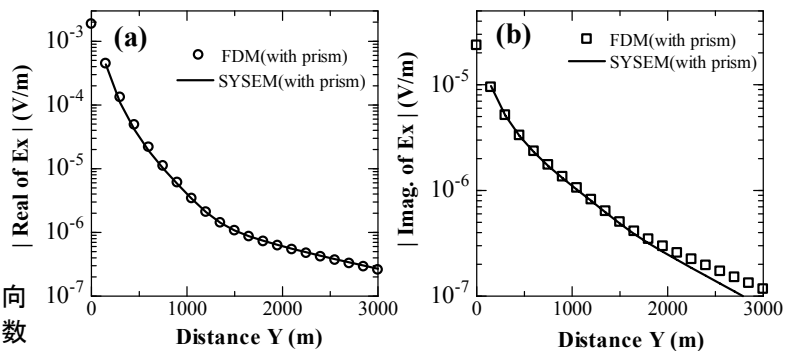
Fig. 3. Profiles of calculated  $E_y$  component (FDM) for the homogeneous half-space model in comparison with the analytic solutions calculated by EM1D code.

均質大地に対する計算結果の  $E_y$  成分について、計算コード EM1D (Kim et al., 1997)を用いて求めた送信源をダイポールで近似した半解析解と比較すると、実部は送信源からのオフセット 6km、虚部はオフセット 4km ぐらいから、差分計算値の精度が悪くなっていることがわかる。また、角柱導体モデルに対する計算結果を、積分方程式法計算コード SYSEM (Xiong, 1992)による数値解と比較すると、 $E_y$  成分の実部については良い一致が見られるが、虚部はやはり精度に問題があることが判明した。



第4図 埋没角柱導体モデル. 送信源は  $x$  方向を向いた長さ 300m の接地電線で送信周波数は 10Hz である.

Fig. 4. Embedded conductive prism model. The excitation source is a 300m long grounded wire directed along the  $x$  axis. The transmitting frequency is 10Hz.



第5図 埋没角柱導体モデルに対する電場  $E_y$  の計算結果(FDM), (a)実部と(b)虚部のプロファイル. 測線は第4図に点線です。積分方程式法による数値解(SYSEM)と比較して示す.

Fig. 5. Profiles of calculated  $E_y$  component for the prism model in comparison with the integral-equation solutions calculated by SYSEM code. The position of the profile line is shown with a dashed line in Fig. 4.

結論として、計算領域端面に近づくにつれて、境界条件の影響が顕著になり、特に電場の離相成分に影響することがわかった。今後さらに境界条件の改良を行い、計算結果の高精度化を図る予定である。

#### 参考文献:

- Kim, H.J., Song, Y., and Lee, K.H., 1997, High-frequency electromagnetic inversion for a dispersive layered earth, *J. Geomg. Geoelectr.*, **49**, 1439-1450.
- Xiong, Z., 1992, EM modeling of three-dimensional structures by the method of system iteration using integral equations, *Geophysics*, **57**, 1556-1561.